

مدل سازی محلی پروفیل چگالی الکترون یون سپهری ماهواره‌ی FORMOSAT-3/COSMIC با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

فریده سبزه ای^۱

محمدعلی شریفی^۲

مهدی آخوندزاده^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۷

چکیده

مطالعه و سنجش یون سپهر در علوم مختلف از جمله مطالعات فضایی و برای بهبود آنالیز و پیش بینی فضایی هوا شامل طوفان‌های ژئومغناطیسی، بررسی پدیده‌ها و ناهنجاری‌های یون‌سپهری، سیستم‌های مخابراتی، ژئوفیزیکی، مطالعه پیش‌نشاندگی زلزله و مخاطرات طبیعی بسیار کارآمد می‌باشد. برای توصیف فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی رخ داده در لایه یون‌سپهر تغییرات پی در پی چگالی الکترون این لایه با تغییرات زمان و موقعیت جغرافیایی موسوم به پروفیل عموی لایه یون‌سپهر (پروفیل چگالی الکترون) مورد استفاده قرار می‌گیرد. اهمیت پایش چگالی الکترون یون‌سپهر بدلیل تأثیری که لایه یون‌سپهر بر روی امواج رادیویی GPS در ناوبری و مخابرات می‌گذارد، سبب مدلسازی و بررسی پارامتر یون‌سپهری در این مقاله گردیده است. تغییرات ناگهانی و زیاد چگالی الکترون در بخش‌های مختلف یون‌سپهر مدلسازی آن را برای تصحیح خطای یون‌سپهری بسیار پیچیده می‌نماید. یکی از جدیدترین روش‌های سنجش از دور برای استخراج پروفیل چگالی الکترون در لایه یون‌سپهر، روش نهفتگی رادیویی (GPS RO) است که قادر به تولید پروفیل‌های چگالی الکترون با توان تفکیک قائم بالایی باشد. در این روش گیرنده‌های GNSS بر روی ماهواره‌های ارتفاع پایین (LEO) قرار گرفته و سیگنال فرستاده شده در راستای خط دید ماهواره‌های LEO و GNSS خم گردیده و اطلاعات لایه‌های اتمسفری (بویژه یون‌سپهر) را ثبت و ضبط می‌نماید. در این مقاله، ابتدا ماهواره‌ی COSMIC معرفی و سپس برای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ (کمینه فعالیت خورشیدی) بکارگیری الگوریتم‌های هوشمند توانسته است کارایی مناسبی در جهت مدلسازی پروفیل‌های چگالی الکترون ارائه دهد. نتایج بدست آمده با پروفیل‌های چگالی الکترون سه نوع مدل مرجع بین‌المللی یون‌سپهری IRI-Corr، IRI-NEQ و IRI-001 مقایسه شده‌اند و چنین نتیجه گرفته شده است که برای کشور ایران، مدل ایجاد شده با شبکه عصبی شباهت بیشتری با پروفیل‌های مشاهده‌ای ماهواره‌ی COSMIC نسبت به پروفیل‌های چگالی الکترون مدل‌های مرجع بین‌المللی یون‌سپهری از خود نشان می‌دهند. واژه‌های کلیدی: پروفیل چگالی الکترون، ماهواره‌ی COSMIC، شبکه‌ی عصبی، مدل مرجع بین‌المللی یون‌سپهری، لایه یون‌سپهر.

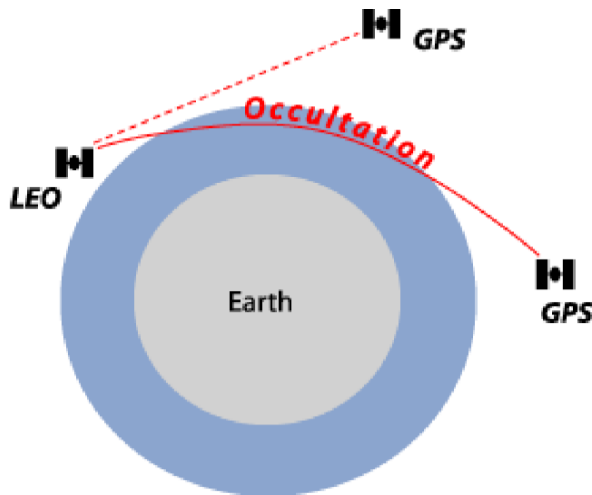
۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-نقشه برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) far_sabzehee@ut.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری و پژوهشکده مهندسی فناوری‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران sharifi@ut.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران makhonz@ut.ac.ir

۱- مقدمه

یا غروب از میان جو زمین می‌باشد. با توجه به معین بودن مشخصات سیگنال ارسالی و محاسبه مشخصات سیگنال دریافتی می‌توان به ویژگی‌های محیط انتشار (یون سپهر) پی برد. در پدیده نهفتگی، دریافت سیگنال در شرایط افق و زیرافق اتفاق می‌افتد و موجب پایین بودن نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. سیگنال‌خیم شده یا همان سیگنال آکلت شده، سیگنالی است که به قدر کافی هنگام عبور از جو مسافتی را موازی سطح زمین حرکت کرده و مسیر حرکت آن از میان لایه‌های جو قسمتی از محیط دایره‌ای به مرکزیت زمین گرفته می‌شود (نگاره ۱).



نگاره ۱: مفهوم نهفتگی رادیویی
(<http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture-notes/GPS/theory/theoryhtml.htm>)

خط واصل بین گیرنده‌ی نصب شده بر روی ماهواره‌ی LEO و ماهواره‌ی GPS به صورت مایل از یون سپهر عبور می‌کند و هر دو ماهواره در حال حرکت هستند، بنابراین امکان تعیین پروفیل‌های ارتفاعی چگالی الکترون از روش نهفتگی رادیویی بوجود آمده است (امیری: ۱۳۹۲: ۲۸-۲۱). با استفاده از معکوس آبل می‌توان مقدار حجم کل الکترون مایل بین دو ماهواره‌ی GPS و LEO را به چگالی الکترون به صورت تابعی از ارتفاع تبدیل کرد و بدین ترتیب پروفیل‌های ارتفاعی چگالی الکترون را بدست آورد (معصومی: ۱۳۹۱) و (منهاج: ۱۳۸۱).

مأموریت‌های GPS و LEO توانایی به دست آوردن پروفیل‌های عمودی انکسار، چگالی، فشار، دما و فشار بخار

یون سپهر بخشی از اتمسفر زمین در ارتفاع حدوداً بین ۵۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتر می‌باشد که از تعامل بین اشعه ایکس و ماورای بنفش با اتمسفر خنثی و همچنین اثرات تابش خورشیدی بوجود آمده است. از آنجا که امواج با فرکانس‌های مختلف وارد جو می‌شوند، لایه‌های یونیدی متعددی در ارتفاعات مختلف شکل می‌گیرد. امواج پرنرژری ماورای بنفش و پرتو ایکس خورشید به طور متناوب وارد جو شده، به اتم‌ها و مولکول‌های گازهای خنثی برخورد کرده و یک یا چند الکترون را از هر اتم جدا می‌کنند. این الکترون‌های آزاد که مقداری از انرژی ماورای بنفش را جذب می‌کنند، تشکیل یک لایه یونیده می‌دهند که یون سپهر نام دارد. یون سپهر محیطی ناهمگن و تغییرپذیر با زمان و مکان می‌باشد.

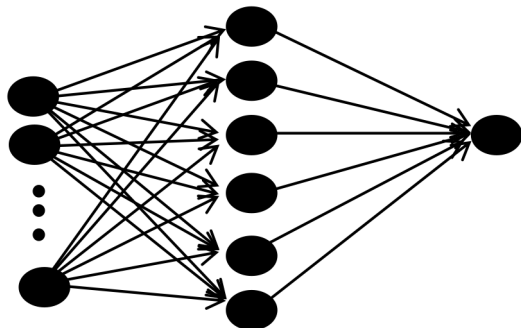
تغییرات زمانی منظم و نامنظم یون سپهر باعث ناپدید شدن، شکست و تفرق سیگنال‌های ارتباطی ماهواره می‌شود. الکترون آزاد در آن لایه بر مسیر امواج رادیویی تأثیرگذار می‌باشند. بنابراین، تحلیل و بررسی ویژگی تغییرپذیری یون سپهری، هم در فیزیک یون سپهر و هم در ارتباطات ماهواره نقش بسزایی دارد. یون سپهر از الکترون‌های آزاد و یون‌ها تشکیل شده است و سرعت امواج رادیویی در نقاط مختلف لایه یون سپهر بسته به مقدار الکترون موجود در آن لایه متفاوت خواهد بود (امیری: ۱۳۹۲: ۲۸-۲۱) و (معصومی: ۱۳۹۱).

برای توصیف فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی رخ داده در لایه یون سپهر، پروفیل عمودی لایه یون سپهر اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد. این پروفیل به وسیله سیستم‌هایی موسوم به یونوسوند، نهفتگی رادیویی (GPS RO) و.... بدست می‌آید (همان).

۲- پدیده نهفتگی رادیویی (Radio Occultation)

روش نهفتگی رادیویی یکی از جدیدترین روش‌های پایش پارامترهای جو می‌باشد. پدیده نهفتگی رادیویی بیانگر آنست که دریافت سیگنال در گیرنده در زمانی صورت گیرد که در دید مستقیم فرستنده قرار نداشته باشد. گیرنده معمولاً یک ماهواره LEO و فرستنده یک ماهواره GNSS (GPS) در حال طلوع

اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات می پردازد. در شبکه های عصبی مصنوعی بلوک های ساختاری و یا نرون ها، دستگاه های محاسباتی خیلی ساده ای هستند و ارتباط میان نرون ها، عملکرد شبکه را تعیین می کند و هدف از آموزش شبکه های عصبی مصنوعی تعیین ارتباط مناسب، جهت حل مسائل مختلف است. در این شبکه ها نیز عموماً لایه های موازی نرون ها را می بینیم که نرون های هر لایه نقش خاصی را ایفا می کنند. معمولاً ورودی هایی که از خارج به شبکه عصبی داده می شوند، به دسته ای از نرون ها که در یک لایه مرتب شده اند، اعمال می شود. این ورودی ها با وزن های خاص جمع شده به تابع تحریک هر نرون فرستاده می شوند که این اقدام به پردازش جمع وزن دار ورودی های اعمال شده به نرون می نماید و خروجی نرون را به لایه های بعدی و نهایتاً به لایه خروجی می فرستد که جواب شبکه نسبت به ورودی های اعمال شده به آن است (نگاره ۲).



نگاره ۲: شبکه عصبی مصنوعی شامل چندین ورودی، یک لایه پنهان و یک خروجی نمایش داده شده است.

شبکه های عصبی قدرت محاسباتی خود را در درجه اول از ساختار گسترده موازی حجیم خود و در درجه دوم از توانایی یادگیری و تعمیم دهی به دست می آورند. خاصیت تعمیم دهی به این معناست که شبکه عصبی برای ورودی هایی که در طول آموزش (یادگیری) با آنها مواجه نشده است خروجی های قابل قبولی تولید می کند. این دو قابلیت پردازش اطلاعات، این امکان را به شبکه های عصبی می دهد که به مسائل پیچیده و دارای مقیاس وسیع که تاکنون غیر قابل بررسی بوده اند، پاسخ دهد.

آب در اتمسفر خنثی و چگالی الکترون در یون سپهر را دارند.

۳- معرفی ماهواره FORMOSAT-3/COSMIC

FORMOSAT-3/COSMIC مجموعه شش ماهواره ای که به اختصار COSMIC هم خوانده می شود، یک مأموریت مشترک بین ایالات متحده آمریکا و تایوان است که در ۱۴ آوریل ۲۰۰۶ با موفقیت به فضا پرتاب شد و به جز یکی از ماهواره ها سایر پنج ماهواره همچنان به مأموریت خود ادامه می دهند. مدار ماهواره ی COSMIC دایره ای بوده و ارتفاع مداری اولیه این ماهواره ها ۵۰۰ کیلومتر از سطح زمین در نظر گرفته شده ولی به تدریج به ارتفاع ۸۰۰ کیلومتری برده شدند. زاویه میل مدار هر ماهواره ۷۲ درجه، جدایی بین ماهواره ها ۳۰ درجه و دوره تناوب مدار هر ماهواره ۱۰۰ دقیقه است (Liou & et al, 2007: 3813-3826), (Anthes & et al, 2008: 313-333) مأموریت COSMIC با این هدف طراحی شده بود که محصولات تقریباً آبی با پوشش جهانی برای ارتفاعات مختلف تولید کند (Liou & et al, 2009), (Liou & et al, 2007).

قبل از استفاده از مشاهدات نهفتگی رادیویی پیش پردازش ها و آزمون های کنترل کیفیت بر روی آنها انجام می گیرد که شامل: حذف مشاهدات مربوط به ارتفاعات کمتر از ۱۵۰ و یا بیشتر از ۵۰۰ کیلومتر، برآزش پروفیل ها به تابع چاپمن، معیار انحراف میانگین و شیب بخش فوقانی پروفیل چگالی الکترون می باشد (معصومی: ۱۳۹۱). فعالیت های ژئومغناطیسی مرتبط با یون سپهر را با شاخص های ژئومغناطیسی بیان می کنند که بارزترین شاخص ژئومغناطیس KP می باشد و بیانگر تابش ذرات خورشیدی و به نوعی فعالیت مغناطیسی خورشیدی می باشد. شاخص Kp، یک شاخص سه ساعته جهانی است.

۴- روش تحقیق

۴-۱- معرفی شبکه عصبی مصنوعی

یک شبکه عصبی مصنوعی^۲ ANN ایده ای است برای پردازش

^۱-Contellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate

^۲-Artificial Neural Network

۴-۱-۱- معرفی شبکه عصبی پرسپترون

شبکه‌های پرسپترون چند لایه از نوع شبکه‌های عصبی پیشخور^۱ هستند که یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی عناصر مختلف است (منهاج، ۱۳۸۱). از مهمترین شبکه‌های عصبی که در مهندسی جایگاه خاصی دارند و در زمره کاربردی‌ترین شبکه‌ها به شمار می‌روند، شبکه‌های پرسپترون هستند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، یک نگاشت غیرخطی را به دقت انجام دهند که این همان خواسته بسیاری از مسائل فنی مهندسی است که می‌تواند توسط این شبکه‌ها مطرح شود. پرسپترون یک شبکه غیر بازگشتی است که از یک الگوریتم آموزش با ناظر بهره می‌گیرد. بنابراین، دسته‌های آموزشی آن شامل مجموعه‌ای از بردارهای ورودی همراه با بردارهای هدف دلخواهشان است. در این شبکه بردارهای ورودی شامل حدود پیوسته‌ای از مقادیر است اما بردارهای هدف شامل اعداد باینری یعنی صفر و یک هستند که بعد از آموزش تولید می‌شوند. (Rafiq & etal, 2001)

برای آموزش شبکه پرسپترون تک لایه^۲ (SLPR) زوج بردارهای آموزشی شامل بردارهای ورودی و بردارهای هدف به شبکه داده می‌شود. سپس ماتریس وزن با درایه‌های کوچکی برای همه وزن‌های شبکه به صورت تصادفی فرض می‌شود. بردار ورودی در ماتریس وزن ضرب شده و تابع تحریک حدی باینری (Sign) به این بردارهای وزن‌دار اعمال می‌شود (معادلات ۱-۳).

$$\mathbf{a} = \mathbf{f}(\mathbf{w} \times \mathbf{p} + \mathbf{b}) \quad (1)$$

$$\mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{w}_{11} & \dots & \mathbf{w}_{1R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_{S1} & \dots & \mathbf{w}_{SR} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_S \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_S \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_j = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum (\mathbf{w}\mathbf{p} + \mathbf{b}) > \theta_j \\ 0, & \text{if } \sum (\mathbf{w}\mathbf{p} + \mathbf{b}) \leq \theta_j \end{cases} \quad (3)$$

در معادله ۳، مقدار حدی مربوط به سلول عصبی j

1-Feedforward Network

2-Single Layer

است. اکنون می‌توانیم مقدار خطا برای هر سلول عصبی را به صورت اختلاف خروجی عملی و خروجی هدف از رابطه ۴ محاسبه نماییم (همان).

$$\text{error}_i = \mathbf{t}_i - \mathbf{a}_i \quad (4)$$

۵- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

یون‌سپهر تغییرات زمانی و مکانی زیادی دارد و تغییرات زمانی دربرگیرنده تغییرات منظم و نامنظم می‌باشد، تغییرات منظم قابل مدل‌سازی و پیش‌بینی است ولی به دلیل غیرخطی بودن آن، مدل‌سازی‌اش بسیار پیچیده می‌باشد و عوامل دیگری هم دخیل هستند که ناشی از رفتارهای غیرعادی خورشید نظیر طوفان‌های یون‌سپهری، طوفان‌های وابسته به شفق‌های قطبی و... (Kelley;2009), (Skone;1998), (Hargreaves;1992) می‌باشند و ما را ناگزیر به استفاده از یک جعبه سیاه می‌کنند تا با آماده‌سازی ورودی‌ها و آموزش شبکه، خود را از مواجه شدن با پارامترهای زیاد و پیچیده رها سازیم. برای مدل‌سازی پروفیل چگالی الکترون ماهواره‌ی COSMIC از یک لایه‌ی پنهان با ۵۵ نرون و شبکه پیشخور و الگوریتم یادگیری پس انتشار خطای^۳ (BP) آن Levenberg-Marquardt استفاده شده است.

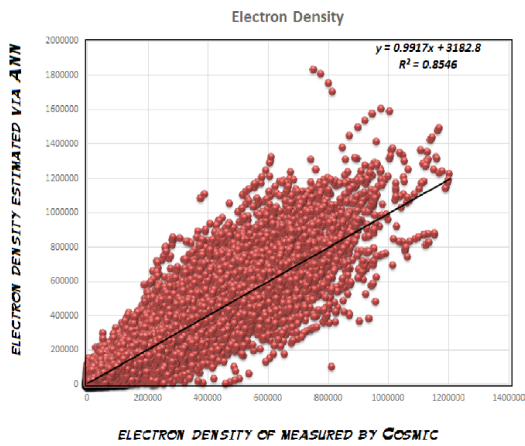
یون‌سپهر تغییرات زیادی دارد و برای مدل‌سازی پروفیل‌های چگالی الکترون آن باید تغییرات زمانی (روزانه و فصلی) و تغییرات مکانی (موقعیت جغرافیایی ایستگاه) را لحاظ نمود. تغییرات روزانه با پارامتر ساعت و تغییرات فصلی با پارامتر روز از سال و موقعیت جغرافیایی با طول، عرض و ارتفاع مدل‌سازی می‌شوند و فضای ورودی ما شامل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، ارتفاع ثبت شده برای لحظه اندازه‌گیری چگالی الکترون، زمان، روز از سال و شاخص F10.7 می‌باشند و خروجی این مدل چگالی الکترون یون‌سپهری (Ne) خواهد بود.

همانطور که در نگاره ۳ و جدول ۱ مشاهده می‌شود

پروفیل چگالی الکترون مدل‌سازی شده با شبکه‌ی عصبی

3- Back Propagation Algorithm

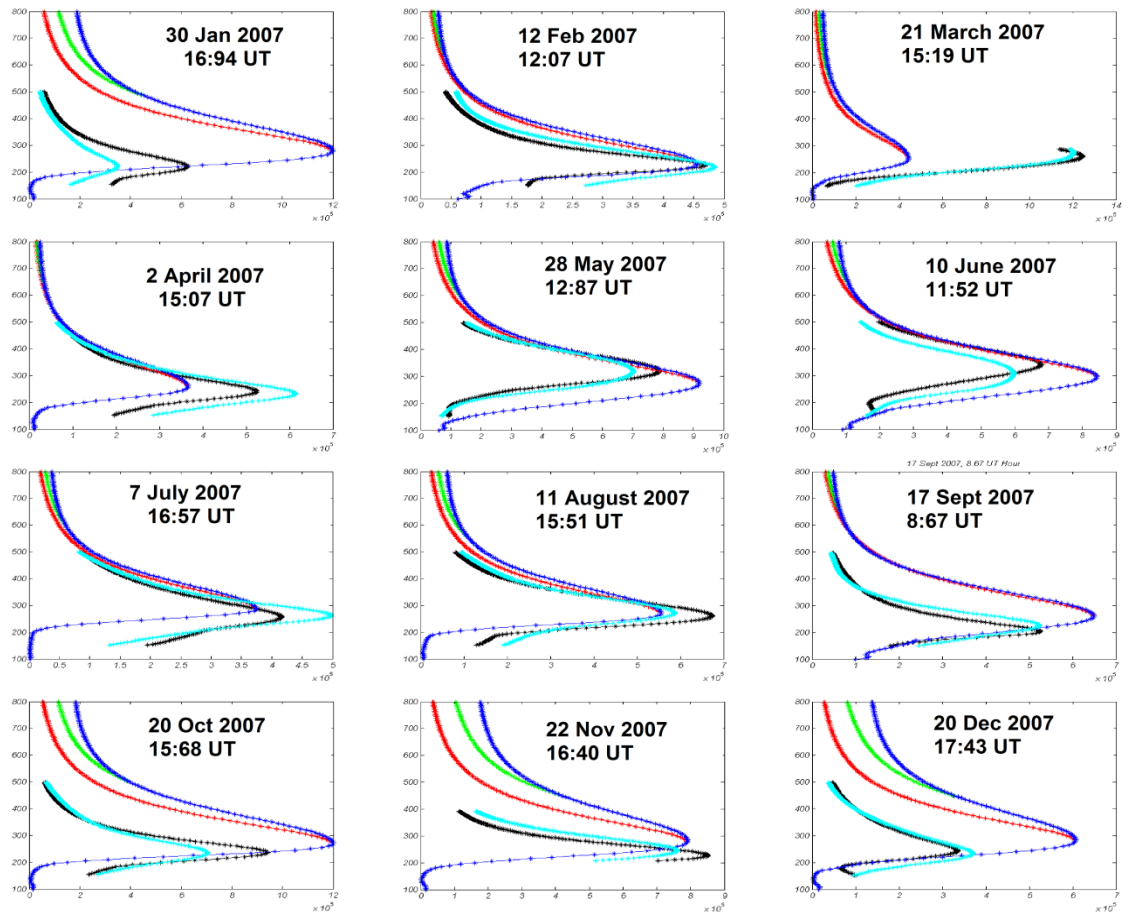
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)
 مدل‌سازی محلی پروفیل چگالی الکترون یون سپهری ... / ۷۷



نگاره ۳: نمودار رگرسیون مدل‌سازی چگالی الکترون ماهواره‌ای
 COSMIC

• ELECTRON DENSITY — LINEAR(ELECTRON DENSITY)

Altitude(km)



Electron density(Cm⁻³)



نگاره ۴: مقایسه‌های میان پروفیل چگالی الکترون اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌ی COSMIC با پروفیل مدل‌سازی شده با شبکه‌ی عصبی و مدل‌های IRI-001, IRI-NEQ, IRI-corr.

اندازه‌گیری و مشاهده ثبت می‌نماید و منوط به ساعات و شرایط جوّی خاصی نمی‌باشد و از طرف دیگر برای چگالی الکترون‌های اندازه‌گیری شده، ارتفاع هم ثبت می‌شود و تقریباً با تغییرات طولی کم، قدرت تفکیک قائم بالایی را در اختیار خواهیم داشت.

مدلسازی پروفیل چگالی الکترون با شبکه عصبی با ضریب همبستگی ۰/۹۲ درصد انجام شده و توانایی شبکه عصبی در تخمین پروفیل چگالی الکترون را نمایش می‌دهد. در مقایسه‌ای که میان سه مدل IRI-Corr, IRI-NEQ و IRI-001 با پروفیل چگالی الکترون ماهواره‌ی COSMIC صورت گرفت، چنین نتیجه داد که مدل IRI-NEQ از دو مدل دیگر مناسب‌تر می‌باشند. همچنین در مقایسه‌ی میان پروفیل چگالی الکترون مدلسازی شده با پروفیل چگالی الکترون مشاهداتی چنین نتیجه گرفته شد که اختلاف میان پروفیل مدلسازی شده با پروفیل مشاهداتی بسیار کمتر (زیر ۲۰ درصد) از اختلاف میان مدل‌های بین‌المللی یون سپهری می‌باشد.

۷- منابع و مأخذ

۱. امیری، ش.، (۱۳۹۲)، سنجش TEC به منظور تصحیح خطای یون‌سپهری در مخابرات ماهواره‌ای به روش نهفتگی رادیویی، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم و فناوری فضایی، شماره ۲، جلد ۶، ص.ص ۲۸-۲۱.
۲. معصومی، س.، (۱۳۹۱)، بررسی تغییرات لایه یون‌سپهر در منطقه ایران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های ارتفاع پایین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی نقشه‌برداری، گرایش ژئودزی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
۳. منهای، م.ب.، مبانی شبکه‌های عصبی، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.
4. Liou, Y.A., A.G. Pavelyev, S.F. Liu, A.A. Pavelyev, N. Yen, C.Y. Huang and C.J. Fong, (2007), FORMOSAT-3 / COSMIC GPS radio occultation mission: Preliminary results. IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp.3813-3826.

و پروفیل چگالی الکترون اولیه از ماهواره‌ی COSMIC با شباهت ۰/۹۲ درصد نسبت به یکدیگر تولید شده‌اند.

جدول ۱. تقسیم بندی دیتاهای چگالی الکترون ماهواره‌ی COSMIC برای ورود به شبکه‌ی عصبی و همچنین ارزیابی مدل تولید شده برای چگالی الکترون

| | |
|-------------|-------------------|
| Train | (80%~433758 data) |
| Test | (20%~108439 data) |
| R2 | 0.83 |
| Correlation | 92% |

در نگاره ۴، پروفیل‌های ماه‌های دوازده گانه‌ی سال ۲۰۰۷ با مدل IRI مقایسه شده‌اند. آنچه نتیجه گرفته می‌شود آن است که برای منطقه مورد مطالعه (ایران) مدل IRI-NEQ از دو مدل دیگر مناسب‌تر می‌باشد و خطای کمتری در تخمین پروفیل چگالی الکترون با مدل IRI-NEQ برآورد می‌شود (Kumar & et al, 2012:66:17).

بیشترین خطاها در ماه‌های ژانویه و دسامبر در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری و کمترین اختلاف‌ها در ارتفاع ۲۵۰ کیلومتر برای ماه نوامبر و در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتر برای ماه آوریل نتیجه گرفته شده‌اند. همچنین در تابستان در ارتفاعات بالاتر و در زمستان در ارتفاعات پایین‌تر، خطا کاهش یافته است. منطقه‌ی مورد مطالعه عرض‌های ژئومغناطیس پایین و متوسط را دربر گرفته و یونیزاسیون در تابستان در ارتفاعات بالاتر و در زمستان به ارتفاعات پایین‌تر حرکت می‌کند (معصومی، ۱۳۹۱).

پروفیل چگالی الکترون مدلسازی شده با شبکه‌ی عصبی بسیار شبیه‌تر از مدل‌های بین‌المللی یون‌سپهری دیگر نسبت به پروفیل مشاهداتی برآورد شده‌اند و همین امر توانایی شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی پروفیل‌های چگالی الکترون ماهواره‌ی COSMIC را نمایش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

تقریباً در تمامی ساعات شبانه روز ماهواره‌ی COSMIC

based ground observation over a low-latitude Singapore station, Earth, Planets and Space, 66:17.

13. http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/gps/theory/theoryhtml.htm

5. Schreiner, S.W., C. Rocken, S. Sokolovskiy, S. Syndergaard and D. Hunt (2007), Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC / FORMOSAT-3 mission. Geophysical Research Letters, vol. 34, issue 4.

6. Liu, L., Wan, W., Ning, B. & Zhang, M. L. (2009), Climatology of the mean TEC derived from GPS Global Ionospheric Maps. J Geophys Res 114: A06308.

7. Anthes, R.A., P.A. Bernhardt, Y. Chen, L. Cucurull, K.F. Dymond, D. Ector, S.B. Healy, S.P. Ho, D.C. Hunt, Y.H. Kuo, H. Liu, K. Manning, C. McCormick, T.K. Meehan, W.J. Randel, C. Rocken, W.S. Schreiner, S.V. Sokolovskiy, S. Syndergaard, D.C. Thompson, K.E. Trenberth, T.K. Wee, N.L. Yen and Z. Zeng (2008), The COSMIC / FORMOSAT-3 mission: Early results. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 89 (3), pp. 313-333.

8. Rafiq, M. Y., Bugmann, G., Easterbrook, D.J., (2001), Neural network design for engineering applications; computers structures 79, 1541-1552.

9. Hargreaves, J. K. (1992), The Solar-Terrestrial Environment: an introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere, Cambridge University Press, Cambridge.

10. Skone, S. (1998), Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region, PhD Thesis, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, Canada.

11. Kelley, M. C. (2009), The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, Intern. Geophys. Series, vol 43. San Diego: Academic Press.

12. Kumar, S., Tan, E.L., Razul, S.G., See, C.M.S., Siingh, D., (2014), Validation of the IRI-2012 model with GPS-

